

透射式固态电光扫描器设计

吴新社, 蔡毅

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要:针对红外成像系统常用光机扫描器的不足,提出了没有机械运动部件的全固态电光扫描器设计方法,给出了几种透射式固态电光扫描器结构,主要包括扫描列阵、耦合波导和控制电路三个部分。工作原理是:通过控制电路顺序控制各扫描单元光信号的传输,再通过耦合波导将光信号耦合到探测器上实现扫描成像。扫描列阵将完整图像分割成图像单元,耦合波导将空间位置不同的图像单元耦合到红外焦平面探测器上,控制电路用来控制扫描列阵各图像单元的工作状态。这种扫描器体积小、重量轻、结构紧凑,采用与红外焦平面探测器制作工艺相似的半导体制作工艺,具有与探测器集成的技术基础,控制起来更加方便。

关键词:电光扫描器; 固态结构; 透射式; 扫描列阵; 耦合波导

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2006)04-0424-05

Design of solid-state electro-optic transmission scanner

WU Xin-she, CAI Yi

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: To improve the performance of the opto-mechanical scanner used for IR imaging system, a new kind of design method for fully solid-state electro-optic scanner was presented, which had no movable elements, and then serial kinds of their configurations were discussed. The scanner mainly consisted of scanning array, coupling waveguide and control circuit. Its principle was that the light signal can be transmitted by controlling each scanning units on scanning array orderly and coupled in IRFPA by coupling waveguide. The scanning array divided the full images into equal pieces, the coupling waveguide coupled light signal of different positions in IRFPA, and the control circuit controlled the states of each scanning units. The scanner has some merits, such as fully solid-state structure, smaller bulk, lighter mass, compatibility, semiconductor manufacture techniques similar to that of IRFPA, potential abilities to integrate with detectors or some other parts of infrared imaging system.

Key words: Electro-optic scanner; Solid-state structure; Transmission; Scanning plane array; Coupling waveguide

0 引言

通常情况下,红外焦平面探测器的探测元数目远远低于人们对于红外图像分辨率的期望值,通过扫描技术或微扫描技术可获得图像像素比相应的红外焦平面探测器探测元数目多得多的红外图像,这是红外成像系统常用的一种技术方案,因此,扫描器是非凝视型红外成像系统必不可少的一个器件,其主要作用是实时改变入射光束的传播方向,使光束沿探测器表面相对运动,以此获得视场扩大或分辨率提高的红外图像。按使用光学元件的不同,扫描器可分为反射式和透射式两种。目前用得最多的是电机驱动反射镜运动的光机扫描器,也有改变介质折射率的电光和声光扫描器^[1]。光机扫描器的主要优点是扫描幅度大、光能损失小、使用寿命长、制造成本低、性能稳定。不足之处:一是器件结构复杂,对伺服电机的运动性能要求较高;二是控制难度大,精度不高;三是器件体积质量较大,功耗较高;四是经过光机扫描器扫描后带来了新的像差^[2];五是扫描效率难以达到100%。因此必须对现有扫描器的结构加以改进,方可解决根本问题。

1 结构和原理

扫描器的基本任务是使图像与探测器之间产生相对运动,获得扫描图像。由于探测器组件结构复杂,体积较大,不便运动,通常是不动的,只是让图像运动即光束偏转,扫描器的运用就是基于这一原理^[3]。光机扫描器通过转动反射镜使光束偏转,从而获得图像与探测器之间的相对运动。透射式固态电光扫描器的扫描原理与光机扫描器类似,也是让图像与探测器之间产生相对运动,但结构上有很大差别。如图1所示,整个器件主要由扫描列阵、耦合波导和控制电路三部分组成。扫描列阵类似一个开关列阵,由若干个形状和大小相同的条形扫描单元组成,每个单元只有开启和关闭两种工作状态。扫描列阵的作用是按预定格式(如逐行、隔行扫描等)扫描景物,获得扫描图像^[4]。耦合波导为平凸透镜或楔形锥体,作用是将扫描列阵传来的入射方向相同、空间位置不同的光信号耦合到探测器上^[5]。控制电路的核心为移位寄存器,它的作用是按顺序控制各扫描单元的通断状态^[6]。

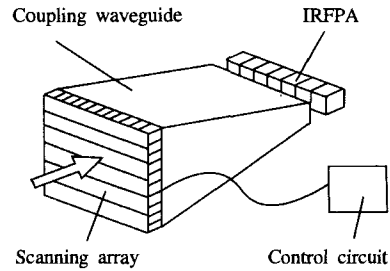


图1 透射式固态电光扫描器结构示意图

Fig.1 Sketch map of solid-state electro-optic transmission scanner

扫描原理:扫描列阵通过顺序开启和关闭各扫描单元获得扫描图像,耦合波导通过自身特定结构将不同空间位置的信号耦合到同一位置——探测器上^[7],从而完成扫描成像任务。如图1所示,设各扫描单元的常态为关闭状态,进入工作状态后,控制电路按照程序依次打开各扫描单元,每一时刻只有一个扫描单元处于开启状态,辐照在扫描列阵上的图像按照列阵格式被分割传送,从而获得扫描图像;耦合波导立即将各扫描单元传来的信号耦合到探测器上,进行光电转换,周期性地重复上述过程即实现扫描成像。透射式固态扫描器的核心是扫描列阵,只要材料的透射率或反射率能够在电场作用下可控变化,则可以用于制作扫描列阵^[8]。整个器件没有运动部件,体积和重量大大缩减,功耗降低,帧频提高。

2 器件结构设计

器件功能和安装要求决定了器件的结构。为实现扫描成像目标,器件应当置于探测器和成像透镜(图中没有画出)之间的光路上。具体做法是将厚度相同、透射率可控的矩形平板材料按相同方向排列成间隙很小的矩形平板列阵,每一矩形平板代表一个扫描单元,通过顺序控制各扫描单元的开关状态,将图像分割并传给耦合波导,再通过耦合波导传给探测器^[9]。透射式固态扫描器的结构设计主要包括材料选择、列阵规划、电极布置、电路设计和波导设计。

2.1 材料选择

材料是整个器件的基础,它的选择非常重要。设计要求列阵材料的光透过率在电场作用下可控,光吸收率要小。常用的透过率可控材料有液晶(Liquid Crystal)、二氧化钒(VO_2)、三氧化钨(WO_3)等。

2.1.1 材料的透光和遮光性能

由于扫描列阵采用的是 0 和 1 调制方式,因此要求材料对器件工作波段内的所有光谱在透光时透过率越大越好,在遮光时遮光率越大越好,二者吸收系数之比小于 1%(用对比度表示为 1:100)。

2.1.2 材料的折射属性

由于入射到扫描列阵的光束大多数为非垂直入射,所以列阵材料是否存在双折射以及折射率大小关系到出射光的性质和方向。列阵的出射光即为波导的人射光,出射光的性质直接影响波导设计,光束方向偏离光轴越大,波导设计的难度就越大,严重时根本无法设计。为防止这种情况,要求列阵材料的折射率要小,最好不要有双折射。垂直入射情况下,对于各向同性晶体材料,出射光垂直出射;对于各向异性晶体,由于存在双折射,出射光中的非常光会偏离垂直方向,偏移量与折射率和晶体厚度有关^[9]。因此对各向异性晶体,要考虑其双折射率和最小工作厚度。

2.1.3 电致变透射率响应时间

各扫描单元响应时间之和为帧时间,因此响应时间关系到器件扫描帧频。设系统设计帧频为 f/Hz ,扫描列阵的扫描单元总数为 n ,则扫描单元响应频率为 fn/Hz ,响应时间为 $1/fn/\text{s}$ 。以帧频为 30 Hz、扫描单元数目为 240 的列阵为例,每一扫描单元的响应时间应小于 $1/(30 \times 240) \approx 139 \mu\text{s}$ 。

2.1.4 材料的薄膜性质

器件选用薄膜材料,一是吸收损耗与光程成正比,选用薄膜材料有利于减少损耗;二是电场强度反比于电极间距,薄膜材料的电极间距要小于体材料,有利于降低驱动电压;三是薄膜材料的均匀性好于体材料,有利于降低图像失真度。

2.2 列阵设计

列阵设计主要包括扫描单元分割尺寸大小的确定、增透膜的膜系设计、电极和电路设计等。

2.2.1 扫描单元分割

以一维扫描为例,如图 2 所示,若被扫描图像的尺寸为 $w \times h (w > h)$,图像格式为 $p \times q (p > q)$,图像长宽与列阵长宽对应,则扫描单元宽度为 w/p ,长度为 h 。这样整幅图像就被分割为尺寸相同的矩形扫描单元^[4]。扫描图幅的大小视系统要求而定,通常扫描单

元的尺寸越大光能损失尤其是高频分量损失越小,耦合效率越高,但是尺寸增大会使整个器件体积、质量及电源功耗增大。

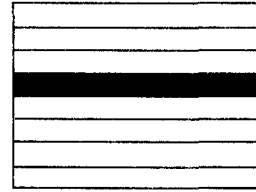


图2 一维扫描列阵示意图

Fig.2 Sketch map of scanning array for 1D

与此类似,二维扫描列阵的设计方法有两种:一种是在同一列阵上分割成长度和宽度都相等的扫描单元,再在每一个扫描单元上做电极和引线;另一种是将两块电极和引线加工好的一维扫描列阵正交排列并封装在一起。从工艺难度和填充因子上看,后一种方法更好些。

2.2.2 电极安排

材料属性决定了电极设计即电压大小、电流方式、电场方向、电极形状、电极材料等。电极是建立电场的基本硬件,材料被夹在电极之间,如图 3 所示。尽可能选择电极平面平行于入射光的方向,否则会造成电极遮光。若电极遮光,则首先选用透光材料,否则应尽量缩小遮光面积。

每个扫描单元需要一对电极,其中一个为公共极,实际上每个扫描单元只需要一个专门连线的电极。此时电极的设计分三种情况:一是电极置于扫描单元长边上,如图 3 所示,每个扫描单元之间需要平行安装相互绝缘的两片电极,这样占用了列阵的面积,填充因子

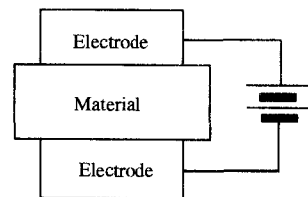


图3 电极与材料位置关系

Fig.3 Position relationship between electrodes and material

变小;二是电极置于扫描列阵(纸面)内,电极平面紧贴扫描面。这样要求电极材料能够透过器件工作光谱,否则应尽量缩小电极面积;三是电极置于扫描单元短边

上,一边作为公共极,另一边作引线极,当然也可交叉设计。第三种电极设置方式,由于两条短边相距较远,电极安装方便,且不占扫描面积,可以说是最佳的方案。具体采用哪种方案,要根据材料对电场的要求及系统功耗要求而定。

2.2.3 增透膜

为了提高透射率,应在入射面上设计增透膜。增透膜的设计同样要看工作光谱,按照透射光谱来设计膜系^[11]。

2.2.4 控制电路设计

控制电路的作用是顺序控制各扫描单元上电场的有无,可以采用数字电路技术中的以移位寄存器为核心的矩阵寻址开关电路。对于一维扫描,其驱动控制电路即为一维移位寄存器。为了提高光学传递函数,控制信号首选矩形脉冲,也可以选择其他形式的脉冲信号^[9,10]。如果各扫描单元的控制信号完全一样,则该扫描器还可用作光调制器。控制信号和图像还原信号由同一信号源给出。

2.3 耦合波导

耦合波导的作用是将传播方向和空间位置不同的各扫描单元送来的光偏转到相同空间位置(探测器)上^[5]。为减少吸收损耗,波导结构应尽可能采用空心形式。能够耦合光束的单一器件有透镜、浸没透镜、光锥和光纤等,下面着重介绍透镜耦合和光锥耦合。

2.3.1 透镜耦合

由于扫描列阵为平面,故透镜设计成平凸透镜,以便列阵与透镜之间能紧密结合,减少光能损失尤其是衍射损失^[11]。另外由于厚透镜体积和质量大,存在一定的吸收率,因此透镜结构选择薄透镜。

如果是线列探测器所要求的一维扫描,透镜就设计成柱透镜,如图4所示,探测器取向平行柱透镜轴线,扫描方向垂直轴线,线列探测器在柱透镜的焦平

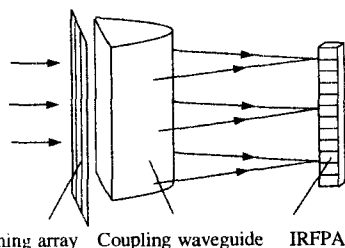


图4 柱透镜耦合示意图

Fig.4 Sketch map of cylindrical lens coupling

面上,这样无论哪个扫描单元透过的光都能耦合到探测器上。柱透镜底部平面的长为 w ,宽为 h ,根据实际需要选定焦距 f ,则透镜曲率半径为^[11]:

$$r=f(n-1) \tag{1}$$

式中: n 为透镜折射率。透镜厚度为:

$$d=r-\sqrt{r^2-w^2/4} \tag{2}$$

如果是扫描单元探测器所要求的二维扫描,耦合透镜就设计成球透镜,如图5所示,探测器置于球透镜的焦点上。球透镜底部圆外接的扫描列阵尺寸为 $w \times h$,则圆直径为 $\sqrt{w^2+h^2}$,根据实际需要选定焦距 f ,透镜曲率半径同公式(1),则透镜厚度为:

$$d=r-\sqrt{r^2-(w^2+h^2)/4} \tag{3}$$

最后,选择透镜材料首先要考虑吸收损耗,其次是机械性能和工艺性能。不同材料有不同的透射窗口,根据器件工作波段选择合适的材料,如可见光可选择玻璃,短波红外可选择石英,中波和长波红外可选择锗单晶、氟化镁等。为简化光学设计,应尽量避免选用双折射材料。

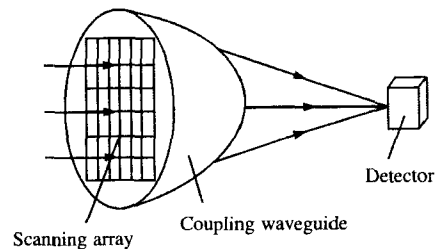


图5 球透镜耦合示意图

Fig.5 Sketch map of spherical lens coupling

2.3.2 光锥耦合

对于衍射现象显著,透镜耦合不能消除光斑弥散情况的必须采用光锥耦合。光锥形如一无顶圆锥或棱锥,可以是空心结构也可以是实心结构,两种结构形式都需要镀上金属反射膜,在实心材料的吸收损耗较大时选用空心结构。

对于线列焦平面所需要的一维扫描列阵,光锥设计成棱锥,如图1所示,光锥大端面与扫描列阵紧密结合,尺寸与扫描列阵相同($w \times h$);小端面与探测器相连,尺寸与线列探测器相同。

若为单元探测器所需的二维扫描,就将光锥设计成圆锥或棱锥,文中选择的圆锥如图6所示,锥的大

端面与扫描阵列紧密粘接,其端面圆外接扫描阵列,圆的直径为 $\sqrt{w^2+h^2}$,锥的小端面与单元探测器相连,尺寸与之匹配。

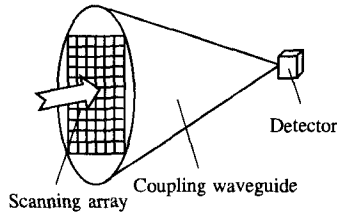


图 6 圆光锥耦合示意图

Fig.6 Sketch map of prism-cone coupling

为保证入射光能够耦合到探测器上,光锥几何结构必须满足一定条件。对于圆锥,若大端面直径为 r_1 和小端面直径为 r_2 ,则光锥轴线长度为^[6]:

$$l = \frac{(r_1 - r_2) \cos \alpha}{r_2 / r_1 - \sin \alpha} \quad (4)$$

式中: α 为入射角。可以用近似方法将棱锥大端面直径换成矩形长度,小端面直径换成探测器宽度,代入公式(4)即可求得。当然光锥也可以设计成曲面形式,这样耦合效率更高,但曲面的加工比较困难。

最后,由于光束通过光锥后传播方向偏离光轴的角度更大了,光轴末端应设计成透镜结构以纠正光束方向。

2.3.3 透镜与光锥组合

在系统对器件的几何尺寸有严格限制时,选择这种组合方式可以有效地减小器件体积和光程差。

2.3.4 器件组装工艺

为防止外界杂散光进入耦合波导带来干扰,保证器件结构牢固,便于扫描器与探测器之间的装配,必须设计不透明的长方体或圆柱体外壳。其截面尺寸与扫描阵列、长度与透镜厚度或光锥长度都相同。装配时,扫描阵列与耦合波导胶合,与外壳镶嵌固连;引线从器件侧面引出与控制电路相连。

3 设计实例

由于很少使用单元探测器,所以设计实例主要针对线列探测器所需的一维扫描,即柱透镜耦合和棱锥耦合两种形式。

设探测器工作中心的波长为 $10 \mu\text{m}$,光学系统的

$f/\# = 1, 288 \times 1$ 的线列探测器的探测元间距为 $40 \mu\text{m}$,则拟扫图像的宽为 $288 \times 40 = 11\,520 \mu\text{m}$,按照4:3的图像格式,拟扫图像的长为 $11\,520 \times 4/3 = 15\,360 \mu\text{m}$,扫描行数为 $288 \times 4/3 = 384$ 。

扫描单元宽度要大于衍射限,根据衍射公式 $d = 2.44\lambda f/\#$ 得到扫描阵列上每一扫描单元(最小扫描单元)的最小宽度为 $2.44 \times 10 \times 1 = 24.4 \mu\text{m}$,为了与拟扫图像对应,这里取为 $40 \mu\text{m}$,长度为线列探测器的长度($11\,520 \mu\text{m}$),得到扫描阵列的尺寸为 $15\,360 \mu\text{m} \times 11\,520 \mu\text{m}$,分割行数为384行。具体形式如图2所示。

3.1 柱透镜耦合

如图4所示,柱透镜的棱平行于线列探测器,底部矩形长 $w = 15\,360 \mu\text{m}$,宽 $h = 11\,520 \mu\text{m}$,柱透镜棱长 $11\,520 \mu\text{m}$,若柱透镜焦距 $f = 5\,000 \mu\text{m}$,材料折射率 $n = 3.3$,则透镜曲率半径:

$$r = f(n-1) = 11\,500 \mu\text{m}$$

透镜厚度:

$$d = r - \sqrt{r^2 - w^2/4} = 2\,940 \mu\text{m}$$

3.2 棱光锥耦合

如图1所示,光锥大端矩形长 $w = 15\,360 \mu\text{m}$,宽 $h = 11\,520 \mu\text{m}$;小端矩形长 $11\,520 \mu\text{m}$,考虑到工艺问题,宽度不能太小,这里取 $2\,000 \mu\text{m}$;然后在其后设计一个会聚光束的平凸透镜。扫描单元数为384,扫描单元长 $11\,520 \mu\text{m}$,宽 $40 \mu\text{m}$ 。

设入射光束垂直于扫描阵列($\alpha = 0^\circ$),棱光锥大端半径 $r_1 = 11\,520 \mu\text{m}$,小端半径 $r_2 = 2\,000 \mu\text{m}$,则光锥长度:

$$l = \frac{(r_1 - r_2) \cos \alpha}{r_2 / r_1 - \sin \alpha} = 54\,835 \mu\text{m}$$

若棱光锥小端出光面平凸透镜焦距为 $1\,000 \mu\text{m}$,折射率为3.3,则其曲率为:

$$r = f(n-1) = 2\,300 \mu\text{m}$$

透镜厚度为:

$$d = r - \sqrt{r^2 - w^2/4} = 229 \mu\text{m}$$

4 结束语

从原理上解决了光机扫描器存在(下转第489页)

参考文献:

- [1] HE Yong. Testing of CCR[J]. **Practical Testing Technolog**(何勇. 锥体棱镜的测试. **实用测试技术**), 1997 (3): 26-29.
- [2] GENG Su-jie, WANG Wen-cheng, LIANG Rong. Machining and testing of CCR[J]. **Optical Technology**(耿素杰, 王文成, 梁荣. 锥体棱镜的加工和检验. **光学技术**), 2000, **26**(6): 538-540.
- [3] MALACARA D. **Optical Shop Testing** [M]. Beijing: Mechanic Industry Press (D. 马拉卡拉. **光学车间检验** [M]. 北京: 机械工业出版社), 1978.
- [4] HE Yong, WANG Qing, ZHU Ri-hong, et al. Sampling and processing of interference patterns in Windows[J]. **Infrared and Laser Engineering**(何勇, 王青, 朱日宏, 等. Windows 环境下干涉图像采集和处理. **红外与激光工程**), 2003, **32**(2): 203-206.
- [5] HE Yong, CHEN Lei, WANG Qing, et al. Phase-shifting infrared twyman-green interferometer and application [J]. **Infrared and Laser Engineering** (何勇, 陈磊, 王青, 等. 移相式泰曼-格林红外干涉仪及应用. **红外与激光工程**), 2003, **32**(4): 335-338.
- [6] HE Yong, GU Wen-li, CHEN Jin-bang. A testing method of the dihedral errors of CCR [J]. **Measurement Technology** (何勇, 顾文礼, 陈进榜. 锥体棱镜角度误差的一种测量方法. **计量技术**), 1999, **50**(3): 13-15.
- [7] KUANG Cui-fang, FENG Qi-bo, LIU Xin. Analysis on the reflecting characters of CCR by vector method [J]. **Applied Optics** (匡萃方, 冯其波, 刘欣. 用矢量方法分析角锥棱镜的反射特性. **应用光学**), 2004, **25**(2): 25-27.
- [8] HE Yong, GUO Ren-hui, ZHU Ri-hong, et al. Research on the best technological parameters of CCR [J]. **Optical Technology** (何勇, 郭仁慧, 朱日宏, 等. 锥体棱镜最佳工艺参数研究. **光学技术**), 2005, **31**(2): 292-293.

(上接第 428 页)

的诸多问题, 它的应用将进一步提高扫描成像系统的图像质量, 简化系统结构尤其是控制部分结构, 缩减扫描器体积和重量, 降低器件功耗, 提高扫描效率, 扫描阵列尺寸较大时可以省去红外光学系统。

参考文献:

- [1] ROGATTO W D. **The infrared and Electro-Optical System Handbook**, vol.3, Componets. [Z]// Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [2] ZHAO Xiu-li. **Design of Infrared Optical System** [M]. Beijing: Mechanical Industry Press (赵秀丽. **红外光学系统设计**. 北京: 机械工业出版社), 1986.
- [3] WANG Zhao-min, WANG Kui-xiong, WU Zong-fan. **Theory and Application of Infrared Spectroscopy** [M]. Beijing: Weapon Industry Press (王兆民, 王奎雄, 吴宗凡. **红外光谱学理论与实践**. 北京: 兵器工业出版社), 1995.
- [4] SONG Fei-jun. **Modern Optical Information Process** [M]. Beijing: Beijing University Press (宋菲君. **近代光学信息处理**. 北京: 北京大学出版社), 1998.
- [5] ZHAO Ce-zhou. **Theory and Technology of Semiconductor Waveguide Optical Device** [M]. Beijing: National Defence Industry Press (赵策洲. **半导体导波光器件理论及技术**. 北京: 国防工业出版社), 1998.
- [6] ZHA Rong-hua. **Digital Electro Circuit** [M]. Yinchuan: People Press of Ningxia (查荣华. **数字电子电路**. 银川: 宁夏人民出版社), 1987.
- [7] TANG Ding-yuan, MI Zheng-yu. **Introduction to Optoelectronic Device** [M]. Shanghai: Shanghai Technology Documentary Press (汤定元, 糜正瑜. **光电器件概论**. 上海: 上海科学技术文献出版社), 1989.
- [8] LI Yu-lin, FU Xiao-li. **Optical Modulator in Space and Its Application** [M]. Beijing: National Defence Industry Press (李育林, 傅晓理. **空间光调制器及其应用**. 北京: 国防工业出版社), 1996.
- [9] ZHANG Xing-yi. **Electronic Display Technology** [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (张兴义. **电子显示技术**. 北京: 北京理工大学出版社), 1995.
- [10] YU Jin-zhong. **Optoelectronic Technology of Semiconductor** [M]. Beijing: Chemistry Industry Press (余金中. **半导体光电子技术**. 北京: 化学工业出版社), 2003.
- [11] BORN M, WOLF E. **Principles of Optics** [M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.